

# บทที่ 11

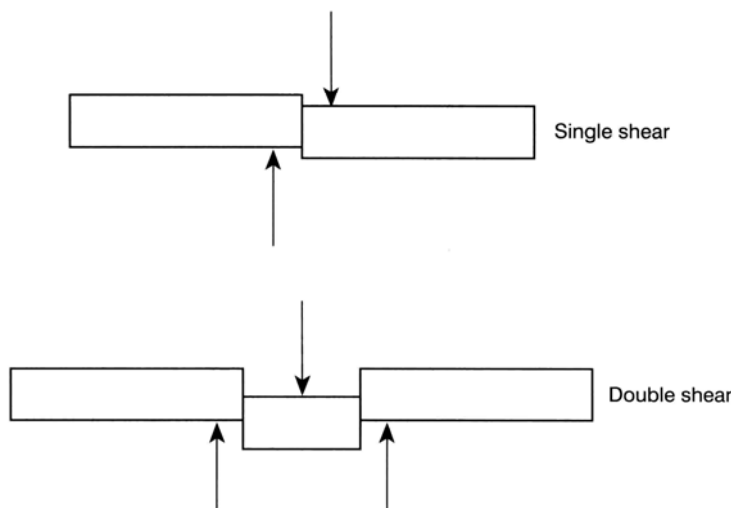
## การทดสอบแรงเฉือน (Shear Testing)

### 1. บทนำ (introduction)

การทดสอบแรงเฉือนเป็นการใส่แรงกระทำในแนวนอนกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบ การเฉือนนี้แตกต่างจากการดึงและการคดซึ่งใส่แรงในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของชิ้นงาน แรงเฉือนสองชนิดที่สำคัญในการกำหนดสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่แรงเฉือนตรง (direct shear) กับแรงเฉือนบิด (torsional shear)

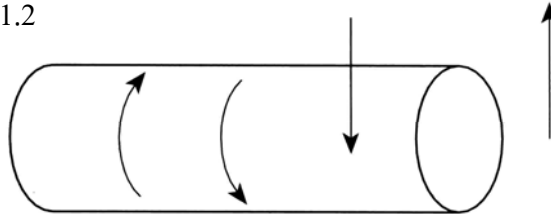
### 2. ทฤษฎี

แรงเฉือนจะเกิดขึ้นถ้ามีการใส่แรงสวนทางกันสองทิศทาง โดยแรงเฉือนตรงสามารถแยกออกได้เป็นสองแบบคือแรงเฉือนเดี่ยว (single shear) กับแรงเฉือนคู่ (double shear) แรงเฉือนเดี่ยวจะเกิดขึ้นตลอดแนวระนาบเดียว ในขณะที่แรงเฉือนคู่จะเกิดระหว่างสองระนาบพร้อมกัน ในทางทฤษฎีความแข็งแรงเฉือนในการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวกับแรงเฉือนคู่ควรมีค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการคดองจึงทำให้แรงเฉือนทั้งสองอาจไม่เท่ากันเสมอไป รูปที่ 11.1 แสดงหลักการของแรงเฉือนเดี่ยวและแรงเฉือนคู่



รูปที่ 11.1 ลักษณะของแรงเฉือนเดี่ยวกับแรงเฉือนคู่

แรงเฉือนบิดเกิดขึ้นจากการใส่แรงในแนวขนานกันในทิศทางตรงข้ามกัน เมื่อ ระยะเวลาไม่ไปด้วยกันกับแนวแกนของชิ้นทดสอบทำให้เกิดแรงบิดขึ้นในลักษณะของการบิดเกลียว ซึ่งทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดตัว และการเฉือนบิดจะเกิดขึ้นถ้ามีการบิดเกลียวในทิศทางตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 11.2



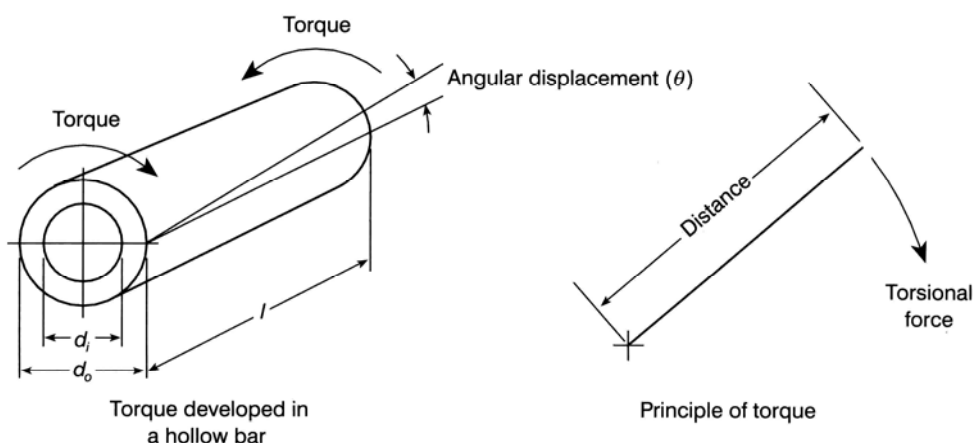
รูปที่ 11.2 ลักษณะของแรงเฉือนบิด

แรงบิดที่เกิดขึ้นในวัสดุเป็นผลจากการบิดตัว โดยแรงบิดนี้เป็นแรง  $f$  ที่ให้กับวัสดุตลอดระยะทาง  $d$  แรงบิดที่กระทำสามารถคำนวณได้จากผลคูณของแรงกับระยะทางที่แรงนั้นกระทำดังสมการ

$$T = f \times d$$

หรือ  $T = L \times a \times d$

เมื่อ  $L$  คือน้ำหนักที่กระทำในหน่วยกิโลกรัม (kg)  $a$  คือความเร่ง ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ) และ  $d$  คือระยะที่แรงกระทำในหน่วยเมตร (m) ดังนั้นค่าแรงบิดจะมีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (N.m) หรือ จูล (Joules, J) หน่วยของแรงบิดโดยทั่วไปได้แก่ ปอนด์นิ้ว (in-lb) หรือ ปอนด์ฟุต (ft-lb) และ นิวตันเมตร หรือ จูล หลักการของแรงบิดได้แสดงในรูปที่ 11.3



รูปที่ 11.3 หลักการของแรงบิด

ตัวอย่างที่ 11.1

จงคำนวณแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการใส่แรง 100 ปอนด์ ในระยะทาง 18 นิ้ว

จาก  $T = f \times d = 100 \text{ ปอนด์} \times 18 \text{ นิ้ว}$   
 $= 1800 \text{ ปอนด์นิ้ว}$

หรือ  $= 100 \text{ ปอนด์} \times (18 \text{ นิ้ว}/12 \text{ นิ้ว}) \text{ ฟุต}$   
 $= 150 \text{ ปอนด์ฟุต}$

แรงเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบทรงกระบอกตันจะคำนวณด้วยสมการต่อไปนี้

$$\sigma = \frac{16 T}{\pi d^3}$$

- เมื่อ  $\sigma$  คือความแข็งแรงบิดสูงสุด (ปอนด์ต่อตร.นิ้ว, lb/in<sup>2</sup> หรือพาสคาล, Pa)  
 $T$  คือแรงบิด (ปอนด์นิ้ว, in-lb หรือนิวตันเมตร, N.m)  
 $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ (นิ้ว หรือ เมตร)

ตัวอย่างที่ 11.2

จงคำนวณความแข็งแรงบิดสูงสุดของแท่งทดสอบตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ซึ่งต้องใช้แรงบิด 500 ปอนด์นิ้วในการแตกหัก

$$\sigma = \frac{16 T}{\pi d^3} = \frac{16 \times 500 \text{ ปอนด์นิ้ว}}{3.14 \times 0.5^3 \text{ นิ้ว}^3} = 20,372 \text{ ปอนด์ต่อตร.นิ้ว}$$
$$= 140 \text{ เมกกะพาสคาล}$$

ถ้าชิ้นทดสอบเป็นชิ้นงานกลวงหรือเป็นท่อสมการการคำนวณความแข็งแรงบิดสูงสุดจะได้เป็น

$$\sigma = \frac{16 \times T \times d_o}{\pi (d_o^4 - d_i^4)}$$

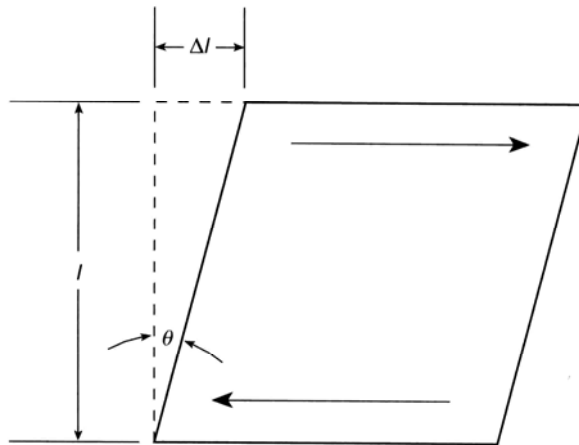
- เมื่อ  $\sigma$  คือความแข็งแรงบิดสูงสุด (ปอนด์ต่อตร.นิ้ว, lb/in<sup>2</sup> หรือพาสคาล, Pa)  
 $T$  คือแรงบิด (ปอนด์นิ้ว, in-lb หรือนิวตันเมตร, N.m)  
 $d_o$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของชิ้นทดสอบ (นิ้ว หรือ เมตร)  
 $d_i$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางรอบในของชิ้นทดสอบ (นิ้ว หรือ เมตร)

ตัวอย่างที่ 11.3

จงคำนวณค่าความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นทดสอบกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอก 0.5 นิ้ว และรอบใน 0.45 นิ้ว ซึ่งต้องใช้แรงบิด 500 ปอนด์นิ้วในการแตกหัก

$$\sigma = \frac{16 \times T \times d_o}{\pi (d_o^4 - d_i^4)} = \frac{16 \times 500 \text{ in-lb} \times 0.5 \text{ in}}{3.14 \times [(0.5 \text{ in})^4 - (0.45 \text{ in})^4]} = 59,238 \text{ lb/in}^2 = 408 \text{ Mpa}$$

ความเครียดที่เกิดจากแรงเฉือนมาจากระนาบในแนวขนานพยายามเคลื่อนผ่านกัน และกัน ความเครียดเฉือนนี้เรียกว่า ดิทรุชัน (detrusion) ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนไปของมุมที่เคลื่อนไประหว่างปลายทั้งสองของชิ้นงานภายใต้แรงบิด ความเครียดเฉือนในช่วงของการเสียรูปแบบยืดหยุ่นจะน้อยมาก โดยมุมที่เปลี่ยนไปนี้จะคิดอยู่ในรูปของเรเดียน ( $2\pi \text{ rad}$  เท่ากับ  $360^\circ$ ) แรงเฉือนและดิทรุชันได้แสดงในรูปที่ 11.4



รูปที่ 11.4 ความเครียดเฉือน ดิทรุชัน (detrusion)

ความเครียดบิดของชิ้นทดสอบตันหรือกลวงสามารถคำนวณได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\epsilon = \frac{\theta \times d \times \pi}{360L}$$

เมื่อ  $\epsilon$  คือความเครียดบิด (นิ้วต่อนิ้ว, in/in หรือเมตรต่อเมตร, m/m)

$\theta$  คือมุมที่เคลื่อนไป (ดีกรี, degree)

$d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ (นิ้ว หรือ เมตร)

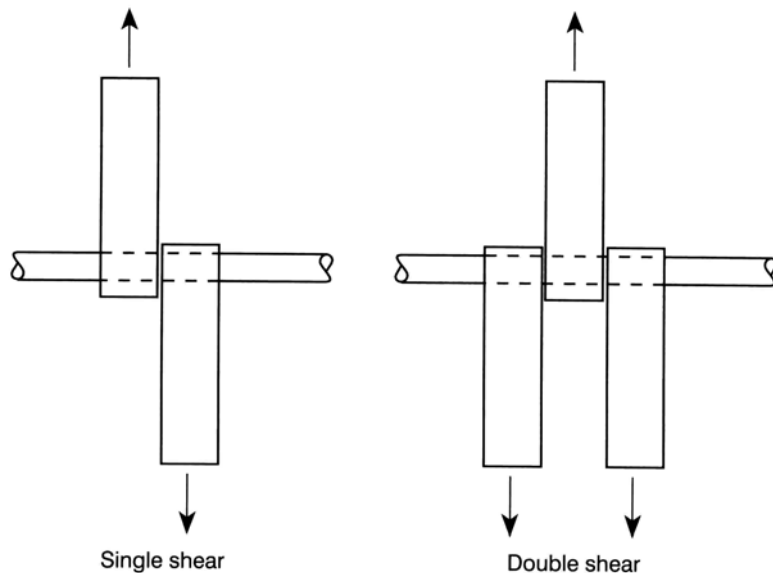
$L$  คือระยะการยึดในช่วงที่ทำการวัดความเครียด (นิ้ว หรือ เมตร)

ตัวอย่างที่ 11.4

จงคำนวณความเครียดบิดของชิ้นทดสอบต้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว โดยเกิดมุมเคลื่อนไป  $3^\circ$  ในช่วงระยะเวลายึด 6 นิ้ว

$$\epsilon = \frac{\theta \times d \times \pi}{360L} = \frac{3^\circ \times 0.5 \text{ in} \times 3.14}{360 \times 6 \text{ in}} = 0.0022 \text{ in/in}$$

การเลื่อนตรงและการเนืองบิดส่วนใหญ่จะทดสอบด้วยการทดสอบแรงเฉือน โดยในการทดสอบแรงเฉือนตรงหรือแบบสวนทางนั้น ชิ้นทดสอบจะถูกตรึงสวนทางกันดังรูปที่ 11.5 การทดสอบแรงเฉือนแบบสวนทางนี้ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุ โดยความแม่นยำของค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับความแข็งและความคมของชุดอุปกรณ์ตรึงยึดชิ้นทดสอบ ข้อจำกัดอื่น ๆ ในการทดสอบแรงเฉือนแบบสวนทางคือไม่สามารถทำการจัดเก็บข้อมูลความเครียดที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อไม่สามารถจัดเก็บข้อมูลส่วนนี้ได้ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาค่าความแข็งแรงช่วงยืดหยุ่นหรือโมดูลัสริจิดิตี (modulus of rigidity) สมบัติทางกลที่สามารถบอกได้จากการทดสอบแรงเฉือนแบบสวนทางมีเฉพาะแรงที่จำเป็นในการเนืองชิ้นทดสอบเท่านั้น และเมื่อนำไปเทียบกับขนาดหน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบทำให้สามารถคำนวณค่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุโดยประมาณได้



รูปที่ 11.5 ลักษณะการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวและแรงเฉือนคู่

การทดสอบแรงเฉือนตรงแบบป้อน (punching shear test) ใช้ได้เฉพาะกับชิ้นทดสอบแผ่นเรียบที่สามารถป้อนผ่านช่องว่างของชุดป้อน โดยชิ้นทดสอบจะเป็นรูหลังการป้อนด้วยแท่งวงแหวนผ่านรูแม่พิมพ์ตัด สิ่งสำคัญคือระยะห่างระหว่างขอบของแท่งวงแหวนตัวป้อน (punch) กับขอบของแม่พิมพ์ตัด (die) เนื่องจากถ้าระยะห่างเกินไปตัวป้อนจะดึงลากหรือตัดงอชิ้นงานขณะเฉือน ทำให้ข้อมูลที่ได้ไม่สามารถนำไปคำนวณหาค่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุได้ การทดสอบแบบป้อนจะทำได้ข้อมูลเกี่ยวกับแรงที่จำเป็นต้องใช้ในการป้อนชิ้นงานให้เป็นรู และสามารถเปรียบเทียบเป็นความต้านทานการป้อนระหว่างวัสดุชนิดต่างๆ

การทดสอบแรงบิดเฉือนจะทำให้เข้าใจสมบัติการเฉือนของวัสดุมากขึ้น โดยชิ้นทดสอบสามารถใช้ได้ทั้งที่เป็นแบบตันและกลวง แต่ต้องยาวมากพอที่จะวัดความเครียดที่เกิดขึ้นด้วยอุปกรณ์ tropometer นอกจากนี้ค่าที่อ่านได้ยังสามารถนำไปหาค่าขีดจำกัดแบบสัดส่วน (proportional limit) ความแข็งแรงจำน (yield strength) เริชเเลียน (resilience) และสติฟเนส (stiffness) หรือโมดูลัสริจิดิตี (modulus of rigidity) ของวัสดุ การคำนวณค่าต่างๆเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับค่าแรงบิดที่กระทำและค่ามุมบิดของชิ้นงานระหว่างการทดสอบ นอกจากนี้ค่าของมุมบิดที่ชิ้นงานแตกหักสามารถใช้เป็นสมบัติความเหนียว (ductility) ของวัสดุ และถ้านำค่ามุมบิดนี้รวมกับความแข็งแรงเฉือนจะสามารถบ่งบอกถึงความแกร่ง (toughness) ของวัสดุ

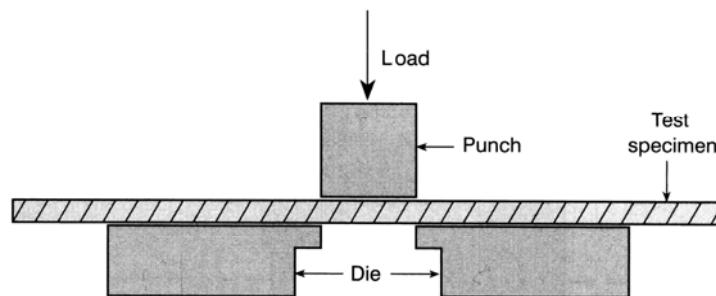
แรงเฉือนบิดสามารถนำไปใช้ได้หลายประเภทการใช้งานของวัสดุ และการทดสอบแรงบิดยังสามารถใช้ในการหาค่าความแข็งแรงเฉือนของเหล็กหล่อ พลาสติก ลวด สายเคเบิล และอื่นๆ ที่หน้าตัดขนาดต่างๆ

### 3. เครื่องมือทดสอบ

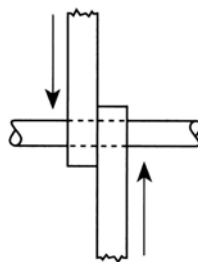
การทดสอบแรงเฉือนปกติใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของการทดสอบว่าเป็นแรงเฉือนเดียวหรือคู่ ซึ่งจะใช้อุปกรณ์เสริมในการจับยึดชิ้นงานต่างกัน และเครื่องทดสอบต้องมีกำลังมากพอที่จะทดสอบชิ้นงานจนแตกหัก ซึ่งปกติจะใช้เครื่องที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยปลายข้างหนึ่งของชิ้นทดสอบจะต้องถูกยึดเข้ากับอุปกรณ์ใส่แรงบิด ส่วนปลายอีกข้างจะเชื่อมกับอุปกรณ์ tropometer ซึ่งใช้วัดดิทริชัน และบางเครื่องยังมีตัวชี้บอกและตัวมาตรวัดเรเดียนอยู่ใน tropometer อีกด้วย เครื่องทดสอบแรงบิดมีขนาดตั้งแต่ 1 kN.m/rad ถึง 200 kN.m/rad แต่ที่ใช้ทั่วไปมีขนาดอยู่ที่ 10 kN.m/rad

#### 4. กระบวนการทดสอบ

ก่อนทำการทดสอบต้องวัดขนาดชิ้นทดสอบและกำหนดระยะทดสอบ (gauge length) ให้ถูกต้อง จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์ troponometer และตั้งค่าเป็นศูนย์ ยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบให้ได้ศูนย์แล้วขันตัวจับยึดชิ้นงานให้แน่น แต่ระวังอย่าให้แน่นจนเกินไปจนชิ้นงานเสียรูป เพราะจะส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ของการทดสอบ กระบวนการทดสอบแรงเฉือนตรงจะมีลักษณะเป็นการยึดปลายข้างหนึ่งของชิ้นทดสอบไว้จากนั้นใส่แรงเฉือนกับชิ้นงานผ่านหัวบีบ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถเปลี่ยนมาทำการทดสอบแรงเฉือนแบบคู่ได้ โดยการยึดปลายชิ้นทดสอบทั้งสองไว้แล้วดึงหัวบีบที่บริเวณตรงกลางชิ้นงาน สำหรับการทดสอบกับชิ้นงานที่เป็นโลหะแผ่นเรียบจะใช้ลักษณะของการบีบชิ้นงานด้วยหัวบีบกลมผ่านแม่พิมพ์รูกลม แต่อย่างไรก็ตามสามารถใช้หัวบีบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและหัวบีบสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้สำหรับชิ้นทดสอบที่พิเศษออกไป แต่โดยทั่วไปแนะนำให้ใช้หัวบีบกลม และเมื่อทำการยึดชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบแล้วให้ใส่แรงดึงหรือแรงอัดอย่างใดอย่างหนึ่งจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตรงแบบต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 11.6



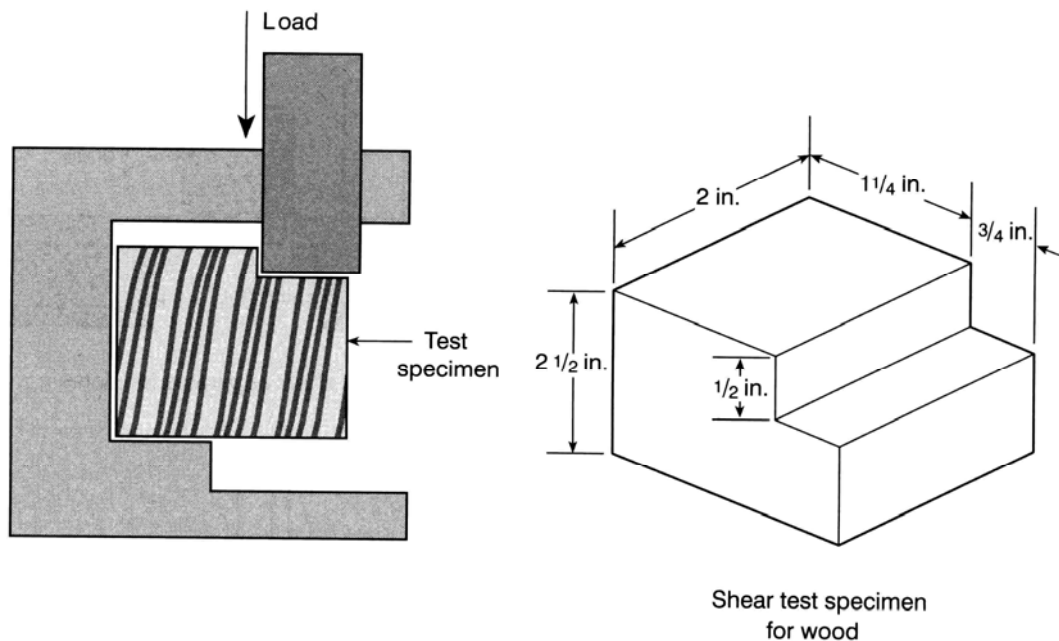
Direct shear apparatus for plates



Direct shear apparatus for round stock

รูปที่ 11.6 ลักษณะเครื่องมือในการทดสอบแรงเฉือนตรง

การทดสอบแรงเฉือนกับวัสดุไม้จะใช้อุปกรณ์จับยึดที่ต่างออกไปและชิ้นทดสอบที่ใช้จะมีลักษณะเฉพาะดังรูปที่ 11.7 โดยความเสียหายควรเกิดขึ้นตลอดแนวเส้นที่ปรากฏด้านข้างชิ้นทดสอบ นอกจากนั้นสามารถทำการทดสอบกับชิ้นงานสองชิ้นที่ติดกาวยึดติดกันตามแนวเส้นที่กำหนดแล้วใส่แรงเฉือนกับชิ้นทดสอบ



รูปที่ 11.7 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนสำหรับวัสดุไม้

โดยทั่วไปตัวจับชิ้นงานต้องแน่นพอและชิ้นงานต้องสามารถขยับตัวอย่างเหมาะสมตลอดการทดสอบ แรงเฉือนที่ใส่ควรเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและตั้งฉากกับแนวแกนยาวของชิ้นทดสอบ ปลายของชิ้นทดสอบต้องยื่นยาวออกมาตลอดแทนปริมทั้งที่เป็นแบบยึดข้างเดียวและแบบยึดสองข้าง ซึ่งจะต้องห่างพอที่จะไม่ทำให้เกิดแรงเค้นคดงอ

อัตราการใส่แรงควรช้าพอที่จะสามารถทำการอ่านค่าที่ถูกต้องด้วยจำนวนครั้งการอ่านที่เหมาะสม เมื่อชิ้นทดสอบผ่านจุดงานอาจเพิ่มอัตราการใส่แรง โดยขณะทดสอบให้ทำการอ่านบันทึกแรงบิดและมุมที่เปลี่ยนไปจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก หรือเสียหายถึงจุดที่กำหนด สำหรับวัสดุโดยทั่วไปอัตราการใส่แรงไม่ควรเกิน 1.25 mm/min (0.05 in/min) และในกรณีของชิ้นงานไม้ไม่ควรเกิน 0.6 mm/min (0.025 in/min)



ขึ้นทดสอบแรงบิดควรวาวพอกที่จะสามารถทำการวัดความเครียดที่เกิดขึ้น และเพื่อลดผลกระทบของแรงเค้นตรงปลายชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากหัวจับชิ้นงาน ปลายของขึ้นทดสอบควรมีสัดส่วนและรูปทรงที่เหมาะสมเพื่อถ่ายและปลอดภัยต่อการจับยึดชิ้นงาน ปลายชิ้นงานทั้งสองควรจะถูกยึดให้อยู่ตรงกลางหัวจับ และเพื่อช่วยให้แน่ใจว่าปลายทั้งสองจะอยู่ตรงกลางหัวจับควรจะทำเครื่องหมายเล็กๆแฝงไว้

การทดสอบแรงบิดเพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับค่าขีดจำกัดสัดส่วนของขึ้นทดสอบควรวางใช้ปลอกสวมบางๆรอบชิ้นงานไว้ โดยปลอกสวมนี้ควรมีการลดลงของพื้นที่หน้าตัดค้ำ และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1 ต่อ 2 และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาปลอกเป็น 10 ต่อ 1 สำหรับอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาที่มากกว่านี้ จะทำให้ชิ้นงานบวมโป่ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการทดสอบ ส่วนขนาดของชิ้นงานสามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับเครื่องทดสอบและวัสดุที่นำมาทำการทดสอบ

สำหรับการทดสอบแรงเฉือนบิดกับขึ้นทดสอบที่เป็นท่อหรือกลวง ส่วนปลายต้องใส่จุกสวมให้เต็มเพื่อป้องกันการบีบแตกของชิ้นงานขณะทดสอบ จุกที่สวมตรงปลายนี้ให้ยาวเท่ากับบริเวณที่หัวจับยึดไว้เท่านั้นและต้องแข็งพอที่จะไม่ยืดออกขณะที่ทำการจับยึด ซึ่งจะส่งผลร้ายต่อผลการทดสอบ การทดสอบแรงบิดกับวัสดุพลาสติกจะทำการทดสอบกับขึ้นทดสอบสี่เหลี่ยมซึ่งจะมีการเจาะรูที่ปลายเพื่อความสะดวกในการจับยึด

## 5. ผลการทดสอบ

ความแข็งแรงเฉือนของวัสดุหาได้จากผลการหารแรงเฉือนที่กระทำ (ปอนด์ หรือ นิวตัน) ด้วยพื้นที่หน้าตัดของขึ้นทดสอบ (ตารางนิ้ว หรือ ตารางเมตร)

ตัวอย่างที่ 11.5

ก. จงคำนวณความแข็งแรงเฉือนของขึ้นทดสอบตรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว และต้องใช้แรงเฉือนเดียว 5000 ปอนด์ในการตัดเฉือน

$$\text{ความแข็งแรงเฉือน} = \frac{\text{แรงที่กระทำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน}}$$

เมื่อพื้นที่หน้าตัดขึ้นทดสอบทรงกระบอกสามารถได้จากสมการ

$$a = \pi r^2$$

ดังนั้น ความแข็งแรงเฉือน =  $5000 \text{ lb} / (3.14 \times 0.125^2 \text{ in}^2)$   
 =  $102,041 \text{ lb/in}^2$  หรือ  $704 \text{ MPa}$

ข. จงคำนวณหาค่าความแข็งแรงเฉือนของชิ้นทดสอบเดียวกันข้อ ก. โดยทำการทดสอบในแบบแรงเฉือนคู่ด้วยแรงกระทำเท่าเดิม

ดังนั้น ความแข็งแรงเฉือน =  $\text{แรงที่กระทำ} / (\text{พื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน} \times 2)$   
 =  $5000 \text{ lb} / (3.14 \times 0.125^2 \text{ in}^2 \times 2)$   
 =  $51,020 \text{ lb/in}^2$  หรือ  $352 \text{ MPa}$

ค. ถามว่าชิ้นงานต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าไรจึงจะสามารถรับแรงเฉือน 5000 ปอนด์ ในการรับแรงเฉือนคู่ ถ้าวัสดุชิ้นนี้มีความแข็งแรงเฉือน 100,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

จาก ความแข็งแรงเฉือน =  $\text{แรงกระทำ} / (\text{พื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน} \times 2)$   
 จะได้ พื้นที่หน้าตัด =  $5000 \text{ lb} / (100,000 \text{ lb/in}^2 \times 2)$   
 =  $0.025 \text{ in}^2$

และจาก พื้นที่หน้าตัด =  $\pi r^2$   
 จะได้  $r = (0.025 \text{ in}^2 / 3.14)^{1/2}$   
 =  $0.004 \text{ in}$

ดังนั้นชิ้นงานต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $0.004 \text{ นิ้ว} \times 2 = 0.008 \text{ นิ้ว}$

ในการทดสอบแรงดึงค่าโมดูลัสปริมาตรหรือค่ายังส์โมดูลัสจะคำนวณจากแรงเค้นกับความเครียดที่เกิดจากแรงเค้นนั้นในการทดสอบในช่วงของการเสียรูปแบบยืดหยุ่น สำหรับการทดสอบแรงเฉือนค่าโมดูลัสเฉือน (shear modulus) จะคำนวณจากแรงเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในช่วงของการเสียรูปแบบยืดหยุ่นดังสมการ

$$E_s = \tau / \gamma$$

เมื่อ  $E_s$  คือโมดูลัสเฉือนของวัสดุ ส่วนอักษรกรีกโบราณ  $\tau$  (tau) คือแรงเค้นเฉือน และอักษรกรีกโบราณอีกตัว  $\gamma$  (gamma) คือความเครียดเฉือน สำหรับมุมที่เกิดขึ้น  $\gamma$  สามารถคำนวณได้จากสมการ  $\gamma = \tan\theta$  โดยโมดูลัสเฉือนจะมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว ( $\text{lb/in}^2$ ) หรือ พาสคาล (Pa)

ตัวอย่างที่ 11.6

จงคำนวณหาโมดูลัสเฉือนของชิ้นทดสอบที่มีความเครียดเกิดขึ้น 0.006 in/in ภายใต้แรงเค้นที่กระทำ 60,000 lb/in<sup>2</sup>

$$E_s = \sigma_s / \epsilon_s = \frac{60,000 \text{ lb/in}^2}{0.006 \text{ in/in}} = 10^7 \text{ lb/in}^2 \text{ หรือ } 69 \text{ GPa}$$

ตัวอย่างที่ 11.7

จงคำนวณหาโมดูลัสเฉือนของวัสดุที่มีมุมเปลี่ยนไป 3° ภายใต้แรงเค้น 2500 lb/in<sup>2</sup>

$$E_s = \tau / \gamma = \frac{2500 \text{ lb/in}^2}{\tan 3^\circ} = 44,703 \text{ lb/in}^2 \text{ หรือ } 329 \text{ MPa}$$

โมดูลัสเฉือนหาได้จากการหารแรงเค้นเฉือนด้วยความเครียดเฉือนหรือใช้สมการ

$$E_s = (F \times h) / (A \times X)$$

เมื่อ F คือแรงที่กระทำ h คือความยาวด้านที่วัดความเครียด A คือพื้นที่หน้าตัด และ X คือระยะยืด

ตัวอย่างที่ 11.8

จงคำนวณหาโมดูลัสของชิ้นทดสอบที่มีหน้าตัด 2 x 2 นิ้ว ซึ่งรับแรงกระทำ 1500 lb และมีความเครียดเกิดขึ้น 0.02 in

$$\begin{aligned} E_s = (F \times h) / (A \times X) &= \frac{1500 \text{ lb} \times 2 \text{ in}}{(2 \text{ in} \times 2 \text{ in}) \times 0.02 \text{ in}} \\ &= 37,500 \text{ lb/in}^2 \text{ หรือ } 259 \text{ MPa} \end{aligned}$$

โมดูลัสเฉือนจะสัมพันธ์กับโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ ดังสมการ

$$E = 2E_s (1 + n)$$

เมื่อ E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ (ยังส์โมดูลัส) E<sub>s</sub> คือ โมดูลัสเฉือนของวัสดุ และ n คืออัตราส่วนพัวของวัสดุ

เนื่องจากอัตราส่วนพัวของวัสดุทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.5 ดังนั้นโมดูลัสเฉือนจึงมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30 ถึง 40 ของโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ

ส่วนโมดูลัสตรีจิตสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E = (T \times L) / (J \times \theta)$$

เมื่อ T คือแรงที่กระทำ (in หรือ kg) L คือระยะที่เปลี่ยนไปของด้านที่วัดความเครียด (ระยะระหว่างสองจุดที่ทำการยึดด้วยอุปกรณ์ tropometer วัดเป็น in หรือ m) J คือจุดหมุนจากกึ่งกลางหน้าตัดชิ้นงาน ( $\pi r^4 / 2$  สำหรับหน้าตัดวงกลม หน่วย  $\text{in}^4$  หรือ  $\text{m}^4$ ) และ  $\theta$  คือมุมที่เคลื่อนไปในช่วงระยะ L (rad) ส่วนหน่วยของโมดูลัสตรีจิตเป็น  $\text{lb/in}^2$  หรือ MPa

ตัวอย่างที่ 11.9

จงหาโมดูลัสตรีจิตของชิ้นทดสอบที่รับแรงบิด 5000 in-lb โดยชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 in และเกิดมุมที่เคลื่อนไป 0.2 rad ในช่วงระยะ 18 in

$$\begin{aligned} E &= (T \times L) / (J \times \theta) = \frac{5000 \text{ in-lb} \times 18 \text{ in}}{0.5 \times 3.14 \times (0.5 \text{ in})^4 \times 0.2 \text{ rad}} \\ &= 4.6 \times 10^6 \text{ lb/in}^2 \text{ หรือ } 32 \text{ GPa} \end{aligned}$$

โมดูลัสตรีจิตควรทำการคำนวณในช่วงขีดจำกัดแบบสัดส่วน เนื่องจากเหนือจุดนี้ไป โมดูลัสตรีจิตจะเพิ่มขึ้น สำหรับวัสดุที่เกิดความเสียหายจากแรงดึงภายใต้การรับแรงบิด ร้อยละการยืดสามารถคำนวณได้จากสมการ  $[(L'-L) / L] \times 100$  เมื่อ L คือระยะทดสอบเริ่มต้น และ L' คือระยะทดสอบสุดท้ายในช่วงมุมที่เปลี่ยนไป และค่านี้ที่ได้สามารถชี้แสดงถึงสมบัติความเหนียวของวัสดุด้วย

ตัวอย่างที่ 11.10

จงหาร้อยละการยืด (% elongation) ของชิ้นทดสอบที่มีระยะทดสอบเริ่มต้น 18 นิ้ว และระยะทดสอบสุดท้าย 19.2 นิ้ว

$$\begin{aligned} \% \text{ elongation} &= [(L'-L) / L] \times 100 \\ &= \frac{19.2 \text{ in} - 18 \text{ in}}{18 \text{ in}} \times 100 = 6.7 \% \end{aligned}$$

ผลลัพธ์การทดสอบแรงเฉือนจะขึ้นอยู่กับชนิดการทดสอบ โดยการทดสอบควรเลือกวิธีที่ใกล้เคียงกับการใช้งานของวัสดุให้มากที่สุด เช่นการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงควรใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นความเครียดเบื้องต้นสามารถทำได้ด้วยการทดสอบแรงบิด ในทางทฤษฎีเมื่อขึ้นทดสอบรับแรงบิดระนาบผิวขึ้นทดสอบจะยังคงสภาพอยู่แม้จะเกิดการเคลื่อน แต่กรณีนี้จะเฉพาะชิ้นงานที่มีหน้าตัดเป็นวงกลมเท่านั้น อย่างไรก็ตามการทดสอบกับชิ้นงานที่มีหน้าตัดรูปอื่น ตัวแปรตามบางตัวยังคงถูกต้องและยังจำเป็นต่อการคำนวณค่าต่างๆ

สำหรับชิ้นงานที่เป็นทรงกระบอกตันในระหว่างการทดสอบบริเวณที่อยู่ด้านในชิ้นงานจะรับแรงเค้นน้อยกว่าที่อยู่บริเวณพื้นผิวภายนอก สังเกตได้จากระยะมุมที่เปลี่ยนไปของแนวเส้นบริเวณกลางชิ้นงานจะตรงข้ามกับแนวเส้นที่บริเวณพื้นผิว ในขณะที่แนวเส้นตรงผิวชิ้นงานรับแรงเค้นเกินขีดจำกัดแบบสัดส่วน ชิ้นงานจะยังสามารถคงสภาพอยู่ได้จากแนวเส้นบริเวณตรงกลางที่รับแรงเค้นน้อยกว่ามาก ทำให้แกนกลางของชิ้นทดสอบสามารถต้านทานแรงเค้นในขณะที่บริเวณพื้นผิวเกิดการจำนน การทดสอบชิ้นงานกลวงหรือท่อจะลดผลกระทบเหล่านี้ได้ โดยแนวเส้นทุกบริเวณของชิ้นงานท่อจะมีค่าแรงเค้นเท่ากับขนาดของแรงเค้นที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากมีการกระจายตัวของแรงได้สม่ำเสมอ และทำให้ได้ค่าความแข็งแรงเหมือนของวัสดุที่ถูกต้องมากกว่า อย่างไรก็ตามถ้าความหนาของผนังท่อลดลงต่ำกว่าค่าวิกฤตค่าหนึ่ง ท่อจะเกิดการยุบตัวเนื่องจากแรงเค้นบีบอัดก่อนถึงจุดจำนนจากแรงเค้นบิด ดังนั้นผลการทดสอบแรงบิดของชิ้นงานท่อจะขึ้นอยู่กับ การเลือกค่าความหนาของผนังท่อชิ้นทดสอบเป็นสำคัญ

## 6. สรุป

แรงเค้นเฉือนเป็นผลของแรงที่ใส่สวนทางกันในทิศตัดขวางแนวแกนขึ้นทดสอบ ผลที่ได้จะเป็นการตัดพื้นผิวชิ้นงานหนึ่งพื้นผิวหรือมากกว่า และแรงเฉือนหลายกรณีจะอยู่ในรูปของแรงบิด ซึ่งจะทำให้ชิ้นทดสอบขาดออกจากกันในลักษณะของการบิดเกลียว ชิ้นงานทั่วไปที่รับแรงเฉือนขณะใช้งาน ได้แก่ หมุดย้ำ นอต ตะปู และสลักต่างๆ เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะต้องถูกออกแบบให้สามารถทนต่อการรับภาระงานที่เป็นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในการใช้งาน

## 7. คำถามท้ายบท

1. มีแรงอะไรบ้างที่เกิดขึ้นนอกจากแรงเฉือนในการทดสอบแรงเฉือนทั้งสองประเภท และแรงอื่นๆที่เกิดขึ้นเหล่านั้นส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบแรงเฉือนอย่างไร
2. จงหาความแข็งแรงแรงเฉือนของหมุดยึดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว และเกิดการแตกหักภายใต้แรงเฉือนเดี่ยว 5000 ปอนด์
3. จงหาความแข็งแรงแรงเฉือนของแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 นิ้ว ที่แตกหักภายใต้แรงเฉือนคู่ 3500 ปอนด์
4. จงหาความแข็งแรงแรงเฉือนของแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ที่แตกหักภายใต้แรงเฉือนคู่ 5000 กิโลกรัม
5. วัสดุที่มีอัตราส่วนพัชของส์ 0.35 และยังส์โมดูลัส  $2 \times 10^7$  ถ้าวัดวัสดุนี้โมดูลัสเฉือนเท่าไร
6. ถ้าชนิดทดสอบหนึ่งมีโมดูลัสเฉือน  $1 \times 10^7$  และมีอัตราส่วนพัชของส์ 0.3 ถ้าวัดวัสดุนี้มียังส์โมดูลัสที่เมกะพาสคาล
7. เพลานหนึ่งรับแรงบิด 5000 ปอนด์ แล้วเกิดมุมบิดไป  $5^\circ$  ในช่วงระยะ 0.25 นิ้ว จงหาโมดูลัสเฉือนของเพลานี้
8. ถ้าเพลานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร รับแรงบิด 3500 กิโลกรัม แล้วเกิดมุมบิดไป  $3^\circ$  ถ้าวัดวัสดุนี้โมดูลัสเฉือนเท่าไร และถ้าเพลานี้มีอัตราส่วนพัชของส์ 0.28 เพลานี้มีค่ายังส์โมดูลัสเท่าไร
9. ถ้าใช้ประแจขันปลายข้างหนึ่งของชิ้นงานซึ่งยาว 12 นิ้ว ด้วยแรง 35 ปอนด์ ถ้าวัดเกิดแรงบิดเท่าไร
10. แท่งทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 นิ้ว รับแรงบิด 250 ปอนด์ฟุต ถ้าวัดเกิดแรงเค้นบิดในชิ้นงานเท่าไร
11. ชิ้นงานท่อเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 3.5 เซนติเมตรและด้านนอก 5 เซนติเมตร รับแรงบิด 25 นิวตัน เมตร ถ้าวัดเกิดแรงเค้นบิดในชิ้นงานท่อกี่พาสคาล
12. ชิ้นงานนอตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว ถูกขันแน่นด้วยแรง 50 ปอนด์ฟุต ถ้าวัดในตัวนอตจะมีแรงเค้นบิดเกิดขึ้นเท่าไร

13. เพลาดันท่อนหนึ่งสามารถรับแรงเค้นบิดได้ 100,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งจำเป็นต้องใช้ ในการส่งถ่ายแรงบิด 250 ปอนด์ฟุต ถ้าวัดว่าเพลาดังกล่าวต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุดเท่าไร
14. ท่อขนาด 0.5 นิ้ว ยาว 3 ฟุต ถูกบิดไปด้วยมุม  $5^\circ$  ถ้าวัดว่าท่อมีค่าความเครียดเท่าไร
15. จงหาความแข็งแรงบิดสูงสุดของท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 0.5 นิ้ว และหนา 0.01 นิ้ว และท่อควรจะมีขนาดเท่าไรจึงจะมีความแข็งแรงบิดเท่ากับท่อตัน
16. ชิ้นงานท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.75 นิ้ว และภายใน 0.65 นิ้ว ยาว 18 นิ้ว กับแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 24 นิ้ว เมื่อใส่แรงบิด 130 ปอนด์ฟุตกับชิ้นงานทั้งสองพบว่ามุมเคลื่อนไป  $7^\circ$  ทั้งสองชิ้น ถ้าวัดว่าชิ้นงานไหนจะมีความเครียดบิดสูงกว่ากัน